

Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)

Using a discrete fractures model for studying fractured aquifers of the Achaean basement of Touba (Northwestern, Côte d'Ivoire)

Koffi Fernand Kouamé, Théophile Lasm, Jean Raynald De Dreuzy, Armel Ghislain Akaffou, Olivier Bour et Philippe Davy

Volume 23, numéro 1, 2010

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/038924ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/038924ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Kouamé, K. F., Lasm, T., De Dreuzy, J. R., Akaffou, A. G., Bour, O. & Davy, P. (2010). Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 23(1), 41–56. <https://doi.org/10.7202/038924ar>

Résumé de l'article

La modélisation des écoulements d'eau souterraine dans les réseaux fracturés est réalisée au moyen d'une approche théorique basée sur les caractéristiques géométriques des fractures du socle archéen de la région de Touba (Côte d'Ivoire). L'étude est basée sur l'exploitation de données structurales (réseau de fractures) déduites d'images satellitaires et validées par des investigations de terrain. La caractérisation des paramètres géométriques (étude des lois d'échelles) et l'étude de la connectivité du réseau sont suivies d'une évaluation du flux et de la perméabilité équivalente du réseau établie au moyen de simulations réalisées avec un modèle hydrogéologique à fractures discrètes, moyennant un certain nombre d'hypothèses (seules les fractures sont perméables, toutes les fractures sont verticales et présentent la même perméabilité, le gradient hydraulique est imposé aux limites d'un domaine carré indépendant de la topographie, etc.). Le réseau de fractures de la région de Touba est un réseau mature (distribution des longueurs de fractures en loi puissance) et fractal (auto-similaire). Les flux ainsi simulés sont fortement canalisés dans les fractures de taille régionale qui contrôlent largement la connectivité du réseau dans ces conditions (hypothèses en matière de caractéristiques du milieu et de gradient hydraulique imposé). Les axes d'écoulement des eaux souterraines, déterminés à partir du modèle hydrogéologique, semblent concorder avec les zones de forages à débits moyens et forts. Ainsi, dans le centre et à l'ouest de la zone d'étude, le modèle testé donne des résultats satisfaisants (concordance partielle entre les chemins de l'eau simulés et les forages à débits moyens et forts). Ce résultat est prometteur dans l'identification des meilleurs sites d'implantation de forages à gros débits.

CONTRIBUTION D'UN MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE À FRACTURES DISCRÈTES À L'ÉTUDE DES AQUIFÈRES FRACTURÉS DU SOCLE ARCHÉEN DE TOUBA (NORD-OUEST, CÔTE D'IVOIRE)

Using a discrete fractures model for studying fractured aquifers of the Achaean basement of Touba (Northwestern, Côte d'Ivoire)

KOFFI FERNAND KOUAMÉ^{1*}, THÉOPHILE LASM², JEAN RAYNALD DE DREUZY³, ARMEL GHISLAIN AKAFFOU²,
OLIVIER BOUR³ et PHILIPPE DAVY³

¹Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), U.F.R des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), U.F.R des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Centre Armoricaïn de Recherche en Environnement (CAREN), Géosciences, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu,
avenue du Gal Leclerc, F35042 Rennes Cedex, France

Reçu le 17 octobre 2006, accepté le 3 mars 2009

RÉSUMÉ

La modélisation des écoulements d'eau souterraine dans les réseaux fracturés est réalisée au moyen d'une approche théorique basée sur les caractéristiques géométriques des fractures du socle archéen de la région de Touba (Côte d'Ivoire). L'étude est basée sur l'exploitation de données structurales (réseau de fractures) déduites d'images satellitaires et validées par des investigations de terrain. La caractérisation des paramètres géométriques (étude des lois d'échelles) et l'étude de la connectivité du réseau sont suivies d'une évaluation du flux et de la perméabilité équivalente du réseau établie au moyen de simulations réalisées avec un modèle hydrogéologique à fractures discrètes, moyennant un certain nombre d'hypothèses (seules les fractures sont perméables, toutes les fractures sont verticales et présentent la même perméabilité, le gradient hydraulique est imposé aux limites

d'un domaine carré indépendant de la topographie, etc.). Le réseau de fractures de la région de Touba est un réseau mature (distribution des longueurs de fractures en loi puissance) et fractal (auto-similaire). Les flux ainsi simulés sont fortement canalisés dans les fractures de taille régionale qui contrôlent largement la connectivité du réseau dans ces conditions (hypothèses en matière de caractéristiques du milieu et de gradient hydraulique imposé). Les axes d'écoulement des eaux souterraines, déterminés à partir du modèle hydrogéologique, semblent concorder avec les zones de forages à débits moyens et forts. Ainsi, dans le centre et à l'ouest de la zone d'étude, le modèle testé donne des résultats satisfaisants (concordance partielle entre les chemins de l'eau simulés et les forages à débits moyens et forts). Ce résultat est prometteur dans l'identification des meilleurs sites d'implantation de forages à gros débits.

Mots clés : *réseau fracturé, télédétection, lois d'échelle, connectivité, modèle à fractures discrètes, Côte d'Ivoire.*

*Auteur pour correspondance :

Téléphone : (225) 22-445-270

Télécopieur : (225) 22-445-270

Courriel : konameff@yahoo.fr

ABSTRACT

The modelling of groundwater flow in a fractured network was carried out using a theoretical approach based on the geometric characteristics of the fractures in the Achaean basement of the Touba region (Ivory Coast). This study is based on structural data (fracture network) interpreted from satellite imagery, and confirmed by field surveys. The characterization of the geometric parameters (study of scale laws) and the study of network connectivity were followed by calculations of flows and equivalent induced permeability using a discrete fractures model based on several hypotheses (*e.g.*, only fractures and fault zones are conducting and permeable; all the fractures are vertical and have the same permeability; the hydraulic gradient is applied on a square domain independent of the topography). The Touba region fractures network is a mature (fracture length distribution follows a power law) and fractal (self-similar) network. The simulated flows are strongly channelled in fractures of regional size which largely control the connectivity of the network under the above assumptions regarding the physiographic characteristics of the area and the imposed hydraulic gradient. The groundwater pathways, determined by the hydrogeologic model, seem to agree with the zones of mean and high yield. In central and western Touba, the model produced satisfactory results (partial conformability between the simulated groundwater pathways and boreholes that have mean and high yields). This result is promising with respect to the identification of the best sites for drilling high yield boreholes.

Key words: *fractured network, remote sensing, law scale, connectivity, discrete fractures model, Ivory Coast*

1. INTRODUCTION

La caractérisation des conditions d'écoulement des eaux souterraines et de transport de soluté dans les réseaux de fractures a fait l'objet de nombreuses études depuis les années 80, à partir de différentes approches théoriques, numériques ou mêmes expérimentales (ANDERSSON et THUNVI, 1986; DAVY *et al.*, 1990; DE MARSILY, 1985; PONTLEVOY *et al.*, 2004).

Dans les pays occidentaux, l'intérêt porté à la modélisation des milieux fracturés, au cours de ces dernières années, a été le plus souvent orienté vers la recherche de sites de stockage de déchets radioactifs. Les nombreux travaux conduits sur les sites de Stripa en Suède (DERSHOWITZ *et al.*, 1991; NERETNIEKS, 1993), de Fanay-Augères en France (CACAS *et al.*, 1990), de Mirror Lake (HSIEH *et al.*, 1993) et de Yucca Mountain (WITHERSPOON, 2000) aux États-unis ont

contribué à améliorer la connaissance et la compréhension du fonctionnement de ces milieux.

Le sous-sol de l'Afrique de l'Ouest est composé quasi exclusivement de roches de socle qui présentent une perméabilité de fractures. L'étude de ces systèmes aquifères est donc fondamentale, notamment pour le captage des eaux souterraines (BIÉMI, 1992; BOUKARI et GUIRAUD, 1985; JOURDA, 2005; KOUAMÉ, 1999; SAVADOGO, 1984; SAVANÉ, 1997), leur gestion (BASSOLÉ *et al.*, 2001; DEWANDEL *et al.*, 2006; MARÉCHAL *et al.*, 2006) ainsi que leur protection.

Les roches des socles cristallin et cristallophyllien sont intrinsèquement très peu perméables. Les fractures qui les affectent sont à l'origine de la quasi-intégralité de leurs propriétés de perméabilité (perméabilité de fractures). Suivant leur densité, leur taille, leur arrangement dans le milieu et leurs propriétés physiques, les fractures modifient considérablement les propriétés hydrauliques des roches de socle (DARCEL, 2002; DE DREUZY, 2000). En effet, les roches cristallines et cristallophylliennes sont dotées d'une porosité interstitielle très faible; donc, la formation des aquifères n'est possible que par l'action du couple fracturation-altération (DEWANDEL *et al.*, 2006). Sur les terrains granitiques, la couche altérée la plus superficielle (saprolite) présente une porosité significative et une faible perméabilité. Lorsqu'elle est saturée en eau, elle forme un réservoir capacitif (MARÉCHAL *et al.*, 2004). Le niveau fracturé-altéré sous-jacent, qui résulte lui aussi des processus d'altération, est un milieu anisotrope et hétérogène. Il est caractérisé par une fracturation horizontale dense dans les premiers mètres et une décroissance de la densité des fractures subhorizontales et subverticales en fonction de la profondeur. Ses propriétés hydrodynamiques sont contrôlées par les processus d'altération (DEWANDEL *et al.*, 2006; MARÉCHAL *et al.*, 2004). Cet horizon fracturé-altéré joue un rôle transmissif. Lorsqu'il est capté par forage, il permet en général de disposer de ressources en eau en toute saison (BIÉMI, 1992). Les discontinuités préexistantes du socle (filons, anciennes fractures, etc.) sont en général marquées par un approfondissement et une verticalisation de cet horizon fracturé-altéré. Il ressort donc que la fracturation, tant ancienne (filons, fractures, etc.) que plus récente (profils d'altération), constitue l'un des principaux paramètres de caractérisation des systèmes hydrogéologiques en milieu de socle.

La structure des réseaux de fractures et leurs caractéristiques hydrodynamiques, sont les principaux éléments qui sont susceptibles d'expliquer le fonctionnement hydraulique des milieux fracturés (BOUR, 1997; DAVY *et al.*, 1990). L'hétérogénéité et l'anisotropie qui les caractérisent ne permettent pas toujours d'utiliser une approche de type milieu continu pour la modélisation des écoulements d'eau souterraine (SNOW, 1969). Dans ce cas, l'approche discrète peut être

appropriée. Se pose alors le problème de la connaissance et de la description détaillée de la structure du réseau de fractures, limite à laquelle se heurte l'approche déterministe, car les réseaux de fractures ne peuvent être décrits, dans la plupart des cas, que de façon partielle. Pour pallier à ce manque de connaissance, une représentation statistique des propriétés du milieu s'avère nécessaire (DE MARSILY, 1985). La géométrie des réseaux est alors décrite par les distributions statistiques des paramètres géométriques des fractures et les propriétés hydrauliques sont estimées à partir du comportement moyen calculé sur de multiples réalisations (DE DREUZY, 2000).

L'objectif du présent travail est l'exploitation des données issues de la télédétection dans un modèle hydrogéologique à fractures discrètes pour déterminer les propriétés hydrogéologiques du socle archéen de Touba (Côte d'Ivoire). À partir d'images satellitaires Landsat-TM et d'investigations géologiques de terrain, la carte du réseau de fractures est établie. Le traitement de ces données, à partir d'outils statistiques, permet d'obtenir une description paramétrique du réseau de fractures (distribution des longueurs, densité, position) et de définir le régime de connectivité. L'analyse de la connectivité permet de calculer les propriétés hydrauliques (perméabilité). Une modélisation mathématique est ensuite effectuée au moyen d'un modèle à fractures discrètes. Enfin, les résultats sont comparés aux données hydrogéologiques de terrain.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La région d'étude est située au nord-ouest de la Côte d'Ivoire (Figure 1). Elle est soumise à un climat tropical de transition, caractérisé par une pluviométrie moyenne de $1\,500\text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$. Le relief est formé de plateaux, d'altitude moyenne égale à 550 m. Quelques monts isolés culminent entre 600 et 750 m et présentent des modelés aux formes massives, à sommets convexes et aux flancs raides. Le réseau hydrographique est très varié (types parallèle, dendritique et en treillis). Il souligne le plus souvent un contrôle structural. Cette région appartient au domaine archéen de la dorsale de Man (CAMIL, 1984; KOUAMÉLAN, 1996) où les formations géologiques (gneiss para et ortho-dérivés, charnockites, migmatites, quartzites) ont subi les influences des mégacycles orogéniques Léonien (3500-2900 Ma.) et Libérien (2900-2500 Ma.). Au plan tectonique, la faille du Sassandra, d'orientation N-S, qui sépare le domaine archéen (Ouest) du domaine paléoprotérozoïque (Est), est la structure la plus importante de l'ouest ivoirien (Figure 1). Cette faille, qui s'étend sur plus de 250 km de long, a une zone de déformation large de plus de 10 km. Au cours de son histoire, cette faille a été en activité à plusieurs reprises, soit de manière dextre, soit de façon senestre (DJRO, 1998; KONÉ et al., 1996). Ces contraintes tectoniques variées ont abouti à la mise en place d'un schéma structural complexe.

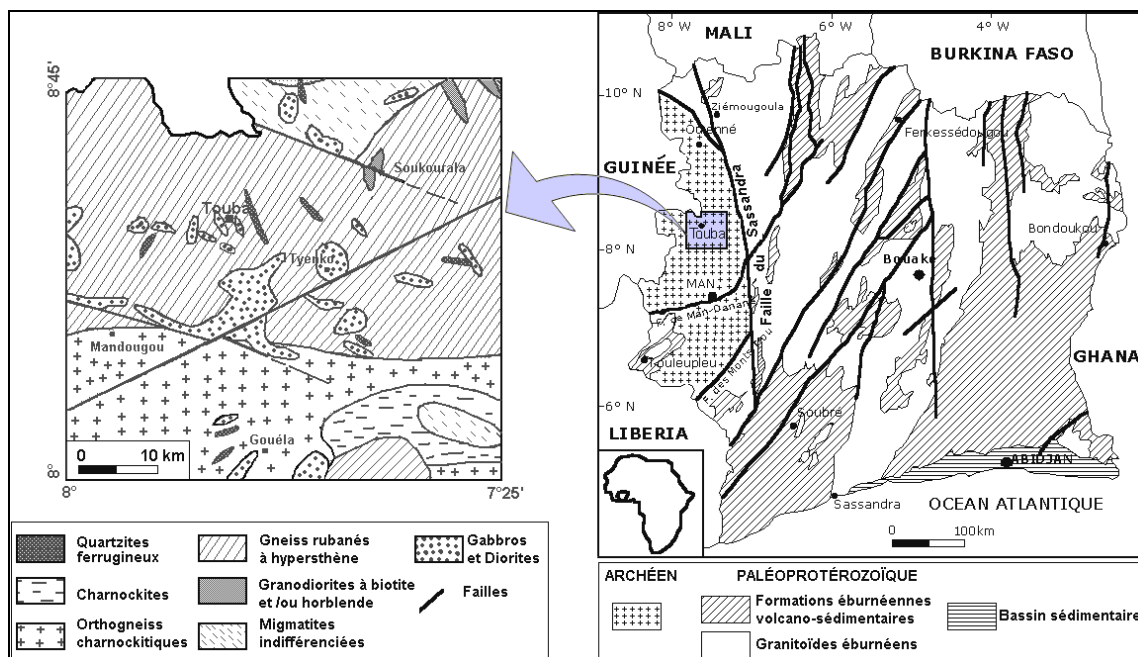


Figure 1. Carte géologique de la région de Touba.
Geological map of the Touba region.

La description des systèmes aquifères à partir des sondages hydrogéologiques révèle un aquifère constitué de deux principaux niveaux. Le premier niveau, en surface, est constitué par les altérites (10-15 m d'épaisseur), à fonction essentiellement capacitive, et le second, immédiatement sous-jacent, est constitué par le réseau fracturé-altéré (25-30 m d'épaisseur) à fonction conductrice. Les venues d'eau les plus importantes se situent au sein de la partie la plus superficielle de ce dernier horizon, qu'il est nécessaire d'atteindre lors de l'exécution des ouvrages de captage (BIÉMI, 1992).

En milieu rural, des débits instantanés de l'ordre de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ par forage sont acceptables pour l'approvisionnement en eau potable. Pour les agglomérations de plus grande taille, comme Touba, des débits dépassant les $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ sont recherchés.

3. MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

3.1 Données utilisées

La base de données géoscientifiques utilisée comporte des images satellitaires Landsat-TM (scène 198-56 acquise le 28/12/1990, en saison sèche), une carte topographique de TOUBA à 1/200 000, une carte géologique à 1/200 000 (DIRECTION DE LA GÉOLOGIE, 1996), des données descriptives des caractéristiques géologiques et hydrauliques des forages (GÉOMINES, 1982) ainsi que des mesures structurales obtenues à partir d'investigations de terrain.

Le traitement numérique des images a été réalisé au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT, Université de Cocody) à l'aide du logiciel ENVI. La modélisation discrète du réseau de fractures est réalisée grâce aux outils développés à l'Université de Rennes 1 (BOUR, 1997; DARCEL, 2002; DAVY *et al.*, 1990; DE DREUZY, 2000).

3.2 Cartographie du réseau de fractures

La cartographie du réseau de fractures du socle archéen de Touba a été réalisée en deux phases : premièrement, le traitement des images Landsat-TM pour l'identification et l'extraction des linéaments, et deuxièmement, la validation structurale grâce aux données géoscientifiques complémentaires. Le terme « linéament » utilisé dans cette étude décrit toute structure ayant un tracé rectiligne ou curviligne (HOBBS, 1904; O'LEARY *et al.*, 1976) et dont l'interprétation a une signification géologique.

Les images Landsat-TM ont été acquises en saison sèche, en l'absence de couverture nuageuse. Elles sont nettes et claires et

présentent une radiométrie satisfaisante, facilitant les analyses géologique et structurale.

Après leur correction géométrique, diverses opérations de traitements numériques sont réalisées afin d'identifier et d'extraire les linéaments. Les exemples de travaux réalisés dans l'anti-atlas au Maroc (HIMYARI *et al.*, 2002; MAHMOUD, 1996), dans le socle précambrien en Côte d'Ivoire (BIÉMI, 1992; KOUAMÉ *et al.*, 1999; SAVANÉ, 1997), dans le Bouclier canadien (DESJARDIN *et al.*, 2000), etc. montrent que l'application des filtres (spatiaux et directionnels) facilite l'accentuation des discontinuités litho-structurales assimilables aux linéaments. Les filtres directionnels de matrice 7×7 de type Sobel, testés avec succès par KOUAMÉ *et al.* (1999) pour la cartographie structurale du secteur Man-Danané, situé au sud de Touba, ont été appliqués dans les directions N-S, E-W, NW-SE et NE-SW. Le tableau 1 présente les matrices appliquées dans les directions N-S et E-W.

Le relevé des linéaments est effectué par interprétation visuelle des bandes TM 3, 4, 5 et 7 rehaussées, des néo-canaux issus des filtrages spatiaux et des images obtenues après l'analyse en composantes principales (Figure 2a). Les différents traitements numériques mettent en évidence les structures géologiques (failles, contacts lithologiques, filons, etc.) de la région de Touba. Sur les images filtrées (Figure 2b), les discontinuités images sont très bien rehaussées et soulignées par les variations brusques de tonalité. L'interprétation visuelle permet d'identifier les linéaments et d'établir la carte détaillée du bâti structural (Figure 3) qui représente les linéaments considérés comme d'origine tectonique.

La deuxième phase de la cartographie structurale est la validation de la nature structurale des linéaments issus de l'interprétation des images satellitaires. Dans un premier temps, les tracés rectilignes relatifs aux activités anthropiques (routes, pistes, lignes de transport d'énergie) ont été éliminés par un croisement avec les cartes disponibles dans la base de données. Ensuite, les investigations géologiques, réalisées aux cours des travaux antérieurs de cartographie géologique (CAMIL, 1984; DIRECTION DE LA GÉOLOGIE, 1996; KONÉ *et al.*, 1996), ont été utilisées pour être confrontées aux résultats obtenus.

Sur la carte obtenue (Figure 3), les pics directionnels relevés (N 80-110°, N 60-70° et N 10-20°) concordent avec les grandes directions tectoniques relevées dans le domaine archéen de la Côte d'Ivoire (CAMIL, 1984; DJRO, 1998; KONÉ *et al.*, 1996; KOUAMÉ, 1999; LASM, 2000). Les linéaments N 80-100° (E-W) ont une répartition statistique prépondérante dans la région de Touba, tout comme dans le secteur de la chaîne des Toura (CAMIL, 1984; KOUAMÉ *et al.*, 2006). Ces accidents structuraux sont d'extension kilométrique et sont le plus souvent observés sur les formations

Tableau 1. Matrice 7 x 7 du filtre de Sobel (directions N-S et E-W).
Table 1. Seven by seven matrix of Sobel filter (North-South and East-West orientations).

Direction Nord-Sud							Direction Est-Ouest						
1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1

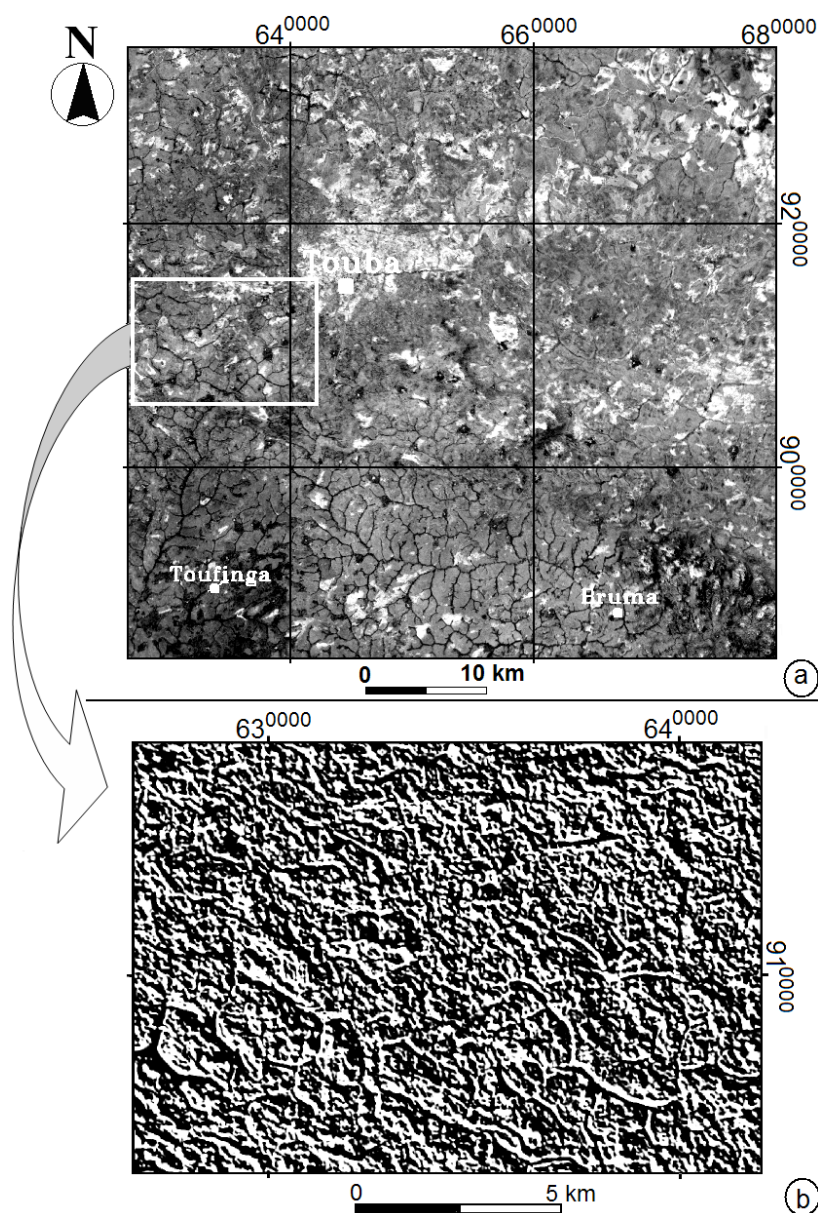


Figure 2. Images Landsat de la région de Touba : a) deuxième composante de l'Analyse en Composantes Principales; b) discontinuités-images rehaussées par le filtrage NE-SW de Sobel (fenêtre encadrée).
Landsat imagery of the Touba region: a) Second component of Principal Component Analysis; b) Image discontinuities enhanced by Sobel NE-SW filtering (window outline).

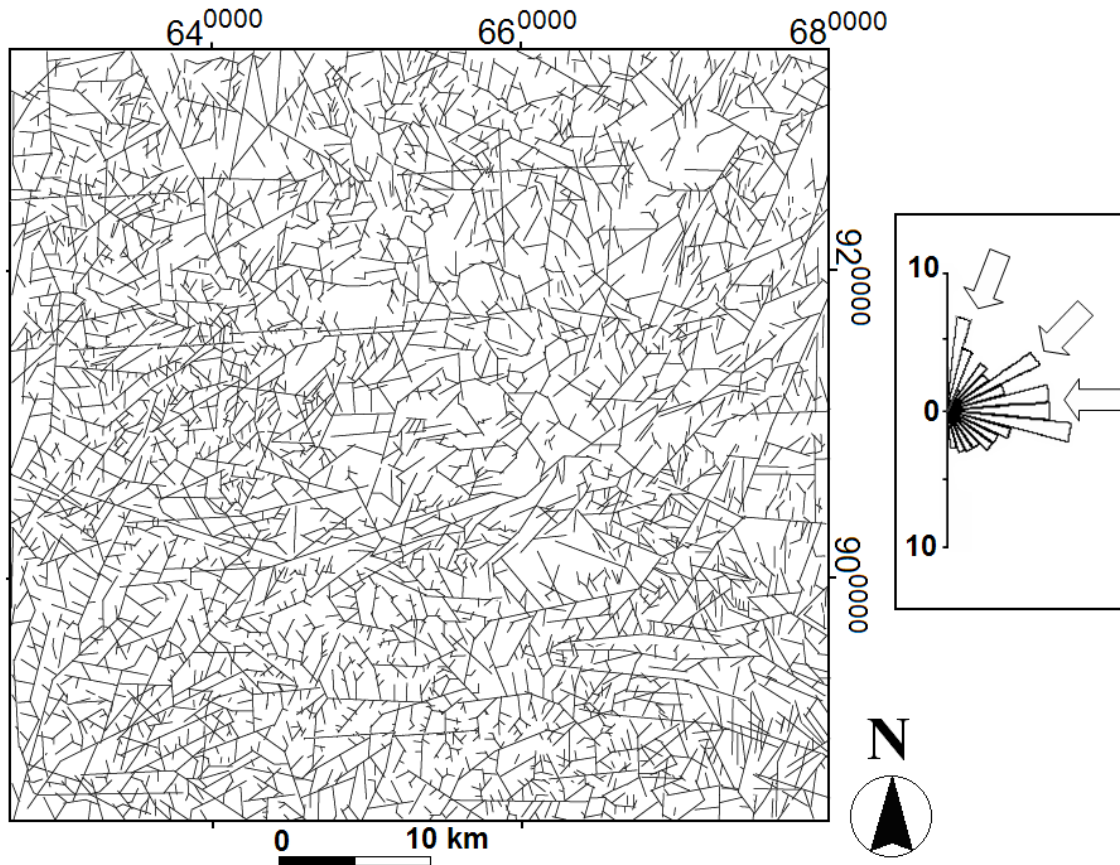


Figure 3. Carte de linéaments du socle archéen de Touba et rosace directionnelle.
Lineament map of the Touba Achaean basement and directional rosette diagram.

charnockitiques et gneissiques. Les observations réalisées à l’affleurement montrent des systèmes de fractures sub-verticales (pendages supérieurs à 80°) dans 80 % des cas et des figures de cisaillements (crochons, queues de recristallisation) exprimant des mouvements dextres ou senestres. La faille E-W, située au sud de la ville de Touba, est un exemple de ce type d’accident.

Les travaux de KONÉ *et al.* (1996) ont mis en évidence un couloir de transpression de direction N-S, limité par les failles du Sassandra à l’est et de Booko à l’ouest. La déformation transpressive post-archéenne N-S s’est faite par aplatissement et cisaillement et a affecté le socle cristallin de Touba qui présente de nombreux témoins de cette déformation (direction N 10-20°). Les accidents tectoniques majeurs du Sassandra (DJRO, 1998), de Booko et Kouroumassa (KONÉ *et al.*, 1996) sont orientés dans cette direction.

Les fractures N 60-70° (NE-SW) marquent l’influence de l’orogénèse éburnéenne (KOUAMÉLAN, 1996). Dans l’ouest de la Côte d’Ivoire, la direction NE-SW, qui est aussi celle des plis isoclinaux affectant les gneiss migmatitiques et les quartzites à magnétite, est l’une des directions considérées comme les plus productives du point de vue hydrogéologique. Les forages captant ces fractures ont des débits forts à très forts (SALEY, 2003).

La densité de fracturation de la région de Touba, et plus globalement du socle archéen de l’ouest de la Côte d’Ivoire, prouve que les effets des événements tectono-métamorphiques des orogénèses léonienne et libérienne sont très importants. En conséquence, le socle a une architecture très fracturée, mise en évidence aussi bien à l’affleurement qu’en imagerie satellitaire, comme c’est le cas à Man-Danané au sud de Touba (KOUAMÉ, 1999) et dans le bassin versant de la Marahoué (BIÉMI, 1992) situé à l’est.

3.3 Caractérisation de la géométrie du réseau de fractures

La détermination des paramètres géométriques du réseau de fractures extrait des images Landsat-TM est basée sur les théories développées par DAVY *et al.* (1990) qui sont fondées sur des observations de la déformation à l’échelle continentale et sur des expériences analogiques de déformation. Elles interprètent les caractéristiques des réseaux de fractures comme étant fractales et proposent un modèle statistique basé sur une double loi puissance (Équation 1).

$$n(l, L) = \alpha L^b l^{-a} \quad \text{pour} \quad l \in [l_{\min}, l_{\max}] \quad (1)$$

où $n(l, L)$ est le nombre de fractures de longueur l dans un sous-système de taille L . L'exposant a caractérise la distribution en loi puissance des longueurs l de fractures dans l'intervalle $[l_{\min}, l_{\max}]$ et l'exposant b est la dimension fractale des barycentres des fractures qui fixe la dépendance d'échelle du nombre de fractures. Le 3^e paramètre α est la densité de fractures (nombre de centres de fractures par unité de surface fractale).

L'étude des lois d'échelles dans le réseau de fractures est réalisée par l'analyse de la distribution statistique des longueurs de fractures. L'étude de la distribution des centres de fractures est réalisée par approche fractale.

L'étude de la distribution des longueurs de fractures peut se faire à l'aide de la distribution des fréquences, des fréquences cumulées et de la densité de fréquence. Dans le présent travail, la courbe de densité de fréquence des fractures relevées dans la région de Touba est ajustée à la loi puissance sur un diagramme bi-logarithmique afin de déterminer le paramètre « a », l'exposant de la loi puissance. Une telle loi permet de mieux caractériser la distribution statistique d'un phénomène tel que la fracturation qui se déploie sur des échelles s'étendant sur plusieurs ordres de grandeur (du local au régional).

Concernant le deuxième paramètre caractéristique des lois d'échelle, soit la dimension fractale « D » du réseau de fractures en 2D, deux approches sont le plus souvent utilisées : la méthode de comptage de boîtes ou « Box counting method » (WALSH et WATTERSON, 1993) et la méthode de la répartition spatiale de masses. La première méthode est très sensible aux effets de bords et est mal adaptée aux réseaux de fractures (OUILLOIN et SORNETTE, 1996). La deuxième méthode a été appliquée dans ce travail. La démarche consiste à assimiler chaque fracture à son centre et à calculer le nombre $N_{(r)}$ de centres de fractures contenus dans des cercles de rayons r réduits progressivement et centrés aléatoirement sur les centres de fractures considérés (BOUR et DAVY, 1997). Cette méthode permet de conserver la notion de fracture discrète en mesurant la dimension fractale sur l'ensemble des barycentres des fractures.

Les travaux de BOUR (1997) montrent que la corrélation spatiale entre les centres de fractures d'un réseau naturel est mieux estimée par la méthode de la fonction de corrélation $C_2(r)$ définie par l'équation 2 (HENTSCHEL et PROCACCIA, 1983) :

$$C_2(r) = \frac{2N_p(r)}{N(N-1)} \quad (2)$$

où $2N_p(r)$ représente le nombre de paires de points dont la distance est inférieure à r et N le nombre total de points du système. La dimension fractale D est déterminée par la pente de la courbe représentative de la fonction de corrélation $C_2(r)$,

dont les points s'alignent suivant une droite dans un diagramme bi-logarithmique.

Le calcul de la dimension fractale D du réseau permet de déterminer b comme suit : $D = b$ si $a > 2$, et $D = b+2 - a$ si $a < 2$. L'avantage du modèle présenté à l'équation 1 tient au fait qu'il permet de dériver le terme de densité de fracture α , qui fixe le nombre moyen de fractures par unité d'aire « fractale » (DAVY *et al.*, 1990). Ce paramètre, indépendant de l'échelle du système, apparaît robuste et représentatif de la loi d'échelle, car il est maintenu constant quelle que soit la taille du domaine étudié.

Le réseau de fractures de la région de Touba comporte des fractures de tailles variant de 45 m à 10 000 m, s'échelonnant donc sur deux ordres de grandeurs (Figure 4a). La distribution des densités de fréquence des longueurs de fractures dans un diagramme bi-logarithmique montre une loi puissance sur deux décades. Entre 900 m et 6 000 m, les données expérimentales sont proches de la droite théorique de la loi puissance (Figure 4b) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,97$. Aux deux extrémités de la distribution, les valeurs expérimentales s'écartent de la loi puissance, en raison des effets liés au sous-échantillonnage des petites fractures (< 900 m) sur les images satellitaires (résolution spatiale, filtrage spatial) et à l'altération de la distribution des grandes fractures ($> 6 000$ m). Ces dernières sont tronquées à cause de la taille du domaine étudié. La fracture la plus longue est de 10 000 m alors que la droite théorique extrapolée donne des valeurs de l'ordre de 20 000 m. Selon ODLING (1997), la meilleure façon de caractériser la distribution des longueurs d'un réseau de fractures serait donc de faire un échantillonnage à différentes échelles (micro, méso et macro) et de recalculer les données pour obtenir une seule distribution.

La loi puissance apparaît comme un bon modèle pour représenter les distributions de longueurs d'un grand nombre de réseaux de fractures (BONNET *et al.*, 2001; BOUR, 1997; DARCEL, 2002; DAVY *et al.*, 1990; DE DREUZY, 2000). Elle présente l'avantage de n'avoir pas de longueur caractéristique en dehors des limites physiques du domaine.

L'exposant a de la loi puissance est égal à 2,17. Cette valeur indique la proportion de petites fractures par rapport aux grandes. La synthèse des exposants réalisée par BONNET *et al.* (2001) indique des valeurs allant de 1,7 à 2,75 avec un maximum autour de 2. La valeur obtenue est donc en accord avec les travaux déjà réalisés et concorde avec les valeurs d'un réseau de failles, généralement comprises entre 1 et 3 (BODIN et RAZACK, 1999; DE DREUZY, 2000). Dans le domaine très accidenté de Man, situé au sud de Touba, LASM (2000) a obtenu une valeur de 2,9. Selon DE DREUZY (2000), la distribution des longueurs de fractures suivant la loi puissance indique que le réseau de fractures étudié aurait atteint un

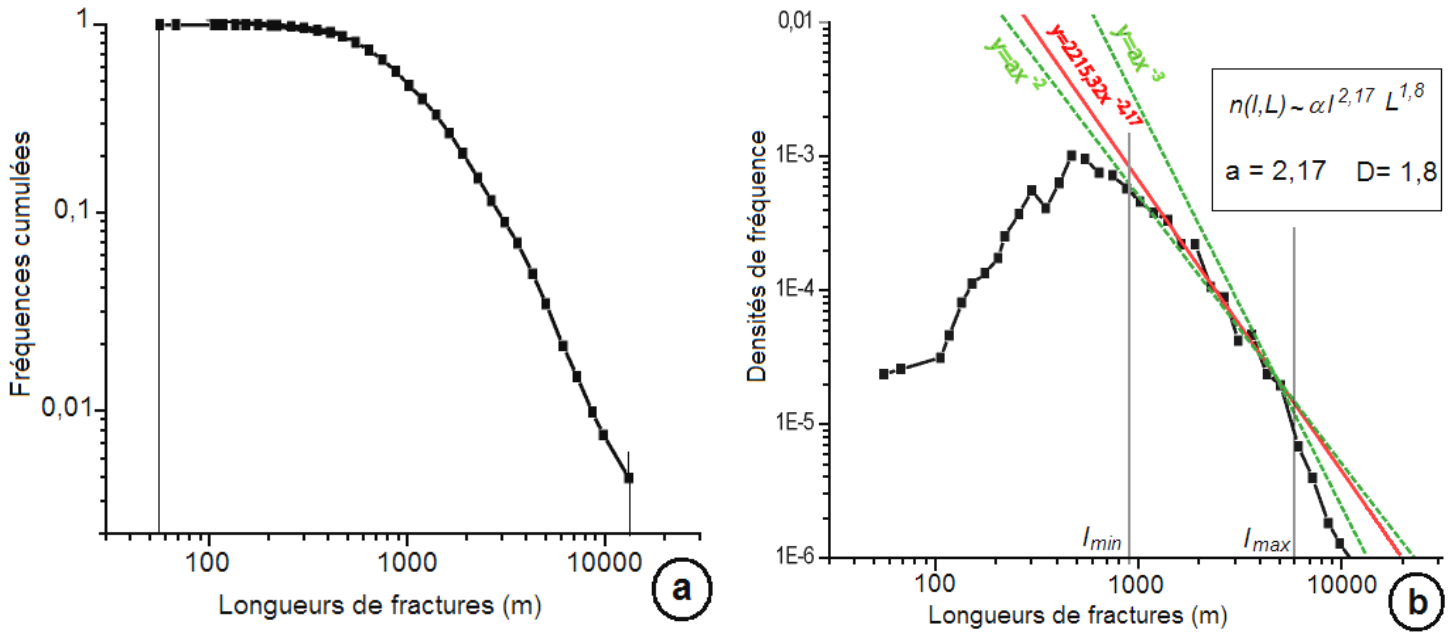


Figure 4. Distribution des longueurs de fractures : a) distribution cumulée; b) densité de fréquence ajustée à la loi puissance.
Distribution of fracture lengths: a) cumulative distribution; b) frequency density graph fit by the power law.

stade de développement très avancé. En effet, le stade final de développement, c'est-à-dire le stade de maturité des réseaux de fractures, correspondrait à la loi puissance. Ce résultat est en accord avec les données géologiques et structurales (CAMIL, 1984; DJRO, 1998) du domaine archéen de la Côte d'Ivoire. L'histoire de la tectonique polyphasée (DJRO, 1998; KONÉ *et al.*, 1996) a conduit à une géométrie complexe du réseau de fractures de Touba. En effet, ce domaine a été structuré grâce aux différents épisodes tectoniques et métamorphiques des mégacycles orogéniques léonien et libérien.

L'étude de la fonction de corrélation a permis de caractériser la distribution spatiale des centres des fractures. La dimension fractale D calculée est égale à 1,8 (si $a > 2$, alors $D = b$). D est très proche de 2, ce qui permet de dire que la distribution des positions de fractures est quasi homogène. La valeur obtenue est inférieure à celle déterminée par LASM (2000) pour la région de Man, qui est de 1,9. VIGNES-ADLER *et al.* (1991) ont analysé à différentes échelles (1/5 000 000 à 1/15 000), les propriétés fractales des failles interprétées à partir d'images Landsat, de photo aériennes et de photographies prises sur le terrain ainsi que des réseaux de drainage issus des cartes topographiques de deux zones tests en Afrique de l'Ouest et Centrale. Ils ont utilisé trois méthodes d'analyse fractale (comptage de boîtes, répartition des masses, approche multifractale) et trouvé des dimensions fractales variant de 1,4 à 1,6 (approche multifractale). Ces auteurs soulignent que le site test des plateaux d'Assaba et de Tagant (sud de la Mauritanie, Afrique de l'Ouest) possède des dimensions fractales plus élevées que celles des sites d'Afrique Centrale (Cameroun, Congo, Centrafrique). Cela est en relation avec le nombre et

les mécanismes de mise en place des systèmes de fracturation de ces différentes zones. Le présent travail réalisé à Touba corrobore les résultats de VIGNES-ADLER *et al.* (1991) en ce sens qu'il montre que le socle archéen ivoirien est très fracturé (dimension fractale proche de 2).

Le modèle géométrique du réseau de fractures de Touba peut donc être décrit comme suit :

$$n(l, L) = 0,03 L^{1,8} l^{2,17} \quad (3)$$

Ce réseau de fractures est caractérisé par une distribution des longueurs de fractures en loi puissance (réseau mature) dans l'intervalle [900 m – 6 000 m]. La distribution de la position des fractures est quasi homogène (fractale). Les caractéristiques géométriques déterminées sont utilisées pour décrire le réseau et permettent de définir le régime de connectivité, facteur pouvant contrôler les modalités d'écoulement des eaux souterraines au sein du système de fractures de la région d'étude.

3.4 Étude de la connectivité du réseau de fractures

Dans le modèle de DAVY *et al.* (1990), chaque fracture est définie par ses paramètres propres (forme, longueur) et par sa localisation par rapport au reste du domaine (densité, position, corrélation). L'évolution de la densité de fracturation à travers les échelles est fractale et la distribution des longueurs est en loi puissance. Ainsi, le réseau de fractures est un ensemble de fractures discrètes et individualisées qui peut être représenté par les propriétés géométriques d'ensemble des fractures. Deux

types de propriétés sont considérés : la structure du réseau et la perméabilité de chaque fracture.

Dans le présent travail, la matrice rocheuse est considérée comme imperméable, seules les fractures étant supposées perméables. Ces dernières sont considérées comme verticales, ce qui permet de travailler en plan (X, Y), et sont supposées perméables sur toute leur extension (selon X et Y), quels que soient leur origine génétique (altération, fracturation tectonique), leur âge et leur orientation. En outre, il est considéré que les fractures présentent toute la même perméabilité ($K_f = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Ces hypothèses fortes, une fois formulées, le transfert de flux et la perméabilité en grand du réseau de fractures dépendent en premier lieu de son état de connectivité (ODLING *et al.*, 1999). À partir du réseau de fractures, il importe de déterminer un domaine dont la taille dépasse significativement la fracture la plus longue. LONG *et al.* (1982) suggèrent qu'un réseau de fractures de taille « L » soit généré dans un système de taille « k L » ($k =$ rapport de proportionnalité; $k > 1$) afin de limiter les effets de bord. En effet, dans le cas des distributions de longueurs de fractures en loi puissance, les effets de bord peuvent être non négligeables. La probabilité de connexion et la perméabilité augmentent quand le rapport entre la taille du réseau et la taille du domaine augmente.

Nous avons extrait un réseau de taille $L = 40 \text{ km}$ dans un domaine de taille $1,5 L$ (60 km) en considérant les intersections entre bords du domaine et fractures, d'une part, et entre fractures, d'autre part. Les fractures connectées forment des groupements appelés amas. Parmi les amas, certains peuvent être connectés aux bords du domaine : ce sont les amas infinis qui fournissent les chemins possibles que peut emprunter un fluide à travers le réseau s'il se déplace d'un bord du domaine à l'autre. Les règles de définition des amas infinis par connexion de deux ou quatre bords sont dénommés R2 et R4 (REYNOLDS *et al.*, 1980).

Dans la présente étude, la règle de connexion R2 a été retenue, malgré la probabilité non nulle d'obtenir plusieurs amas infinis. Un réseau qui connecte les bords non imperméables du domaine aura une perméabilité non nulle (DE DREUZY, 2000).

Lorsqu'un amas relie les quatre bords, ou les deux bords non imperméables opposés du système, il est dit percolant. Pour identifier un amas percolant encore appelé « backbone », il importe de déterminer l'amas le plus grand du réseau et d'étudier ses connexions avec les bordures du domaine. Ensuite, il faut déterminer si la taille de cet amas, normalisée par rapport à la taille du réseau, est supérieure à 0,5; c'est-à-dire que l'amas occupe plus de la moitié de la surface du réseau.

La connectivité est la condition nécessaire à l'observation d'un écoulement à travers un réseau de fractures. L'étude de la connectivité des réseaux a été abordée dans de nombreux travaux, avec des réseaux ayant une distribution de longueurs en loi puissance (BOUR et DAVY, 1997; DE DREUZY *et al.*, 2001), ainsi qu'avec des réseaux de fractures corrélés (distribution de longueurs en loi de puissance et réseau fractal) par DARCEL (2002). Pour un réseau 2D, ayant une distribution en loi puissance des longueurs de fractures, BOUR et DAVY (1997) proposent l'équation 4 comme l'expression qui permet une meilleure détermination du paramètre de percolation :

$$p(L) = \int_{l_{\min}}^L \frac{n(l,L) l^2}{L^2} dl + \int_L^{l_{\max}} n(l,L) dl \quad (4)$$

où L est la taille du domaine, $n(l,L)$ est la distribution donnée par l'équation 1, l_{\min} et l_{\max} sont respectivement les minima et maxima de l'intervalle de distribution des longueurs de fractures.

Le premier terme de l'équation 4 correspond au concept classique de volume exclu (BALBERG, 1984), qui quantifie le nombre moyen d'intersections par fracture dans un système continu, et le deuxième terme comptabilise le nombre de fractures de taille plus grande que le système, qui assurent la connectivité du système par elles-mêmes.

Lorsqu'on s'intéresse à un réseau de fractures de géométrie atypique (large distribution de longueur, par exemple), la principale difficulté est de rechercher un paramètre de percolation qui représente une mesure fiable et pertinente de la connectivité du réseau, c'est-à-dire qui ne dépend pas de l'échelle au seuil de connectivité.

Pour les systèmes de taille infinie, il existe une valeur critique du paramètre de percolation appelé seuil de percolation (p_c). Pour un réseau de fractures donné, si p dépasse p_c , alors le réseau est connecté et sa perméabilité est non nulle; si p est en dessous de p_c , le réseau est non connecté.

Lorsque les règles de connectivité sont établies, il devient possible de calculer des flux et la perméabilité équivalente du réseau de fractures. Les flux ont été déterminés en considérant un domaine d'étude carré au sein duquel deux côtés opposés sont considérés comme imperméables et aux deux autres est affecté un gradient de charge hydraulique (Figure 5).

Dans ces conditions retenues pour son étude, le réseau de fractures de Toubia apparaît comme bien connecté (Figure 6a), excepté le coin sud-est dont l'amas n'est pas connecté (Figure 6b) à l'amas principal. Formé majoritairement de fractures de petites tailles, l'amas principal est connecté aux quatre bords du domaine (amas percolant). Le niveau de

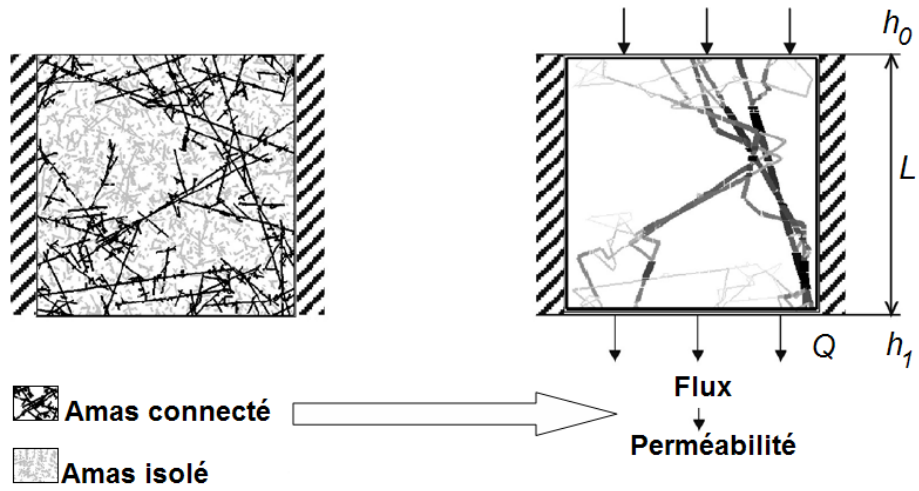


Figure 5. Illustration du calcul des flux et des conditions aux limites utilisées pour le calcul de la perméabilité équivalente.
Illustration of flow modelling and boundary conditions used for the determination of equivalent permeability.

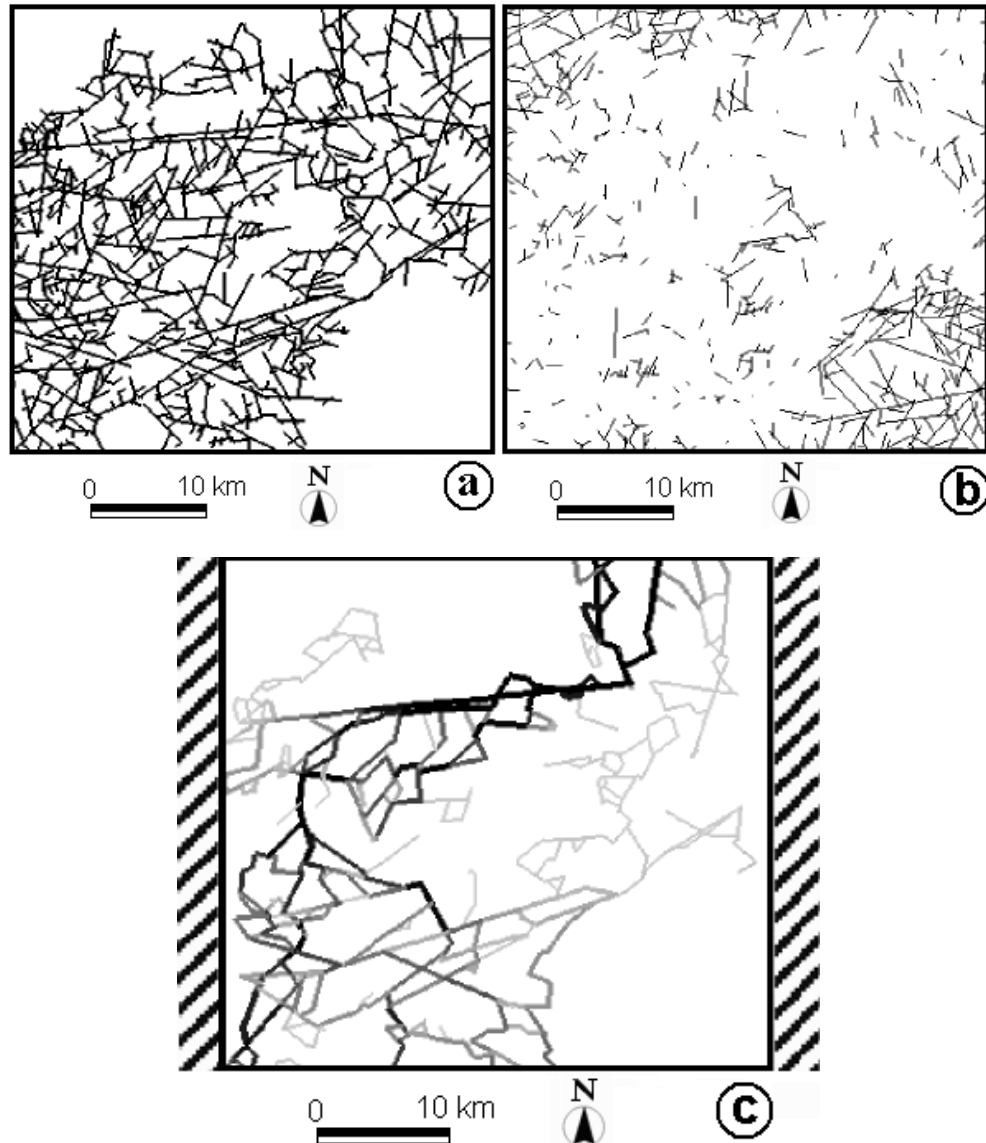


Figure 6. Connectivité et flux simulés : a) amas connecté; b) amas déconnecté; c) flux simulé dans le réseau de fractures (les teintes foncées sont les chemins où le flux est maximum).
Connectivity and simulated flow: a) connected group; b) disconnected group; c) simulated flow in the fracture network (dark colours represent pathways with maximal flow).

connectivité est caractérisé par le paramètre de percolation p estimé à 5,78. Cette valeur traduit une connexion au seuil. Selon DE DREUZY (2000), le paramètre p au seuil varie très peu en fonction de la taille du réseau et tend vers une moyenne de 5,6. La connectivité des réseaux de fractures conditionne énormément les étapes de calcul des flux et de détermination de la perméabilité dans les milieux fracturés. Les travaux de BOUR (1997), DARCEL (2002) et DE DREUZY (2000) ont permis d'élucider les régimes de connectivité des réseaux en fonction de leurs paramètres géométriques. Selon DARCEL (2002), les valeurs relatives des exposants D (dimension fractale) et a (distribution des longueurs) permettent de distinguer différents régimes de connectivité. Lorsque $a < D + 1$, la connectivité à l'échelle du système est entièrement dominée par l'exposant a de la distribution des longueurs de fractures. Ce cas est celui du réseau de fractures de la région de Touba ($a = 2,17 < 2,8$). La connectivité est alors largement contrôlée par les fractures dont la taille est équivalente à la taille du domaine choisi; les fractures de petites tailles jouant un rôle secondaire ($a = 2,17$, est proche de 2). Il en découle que la connectivité du réseau croît avec l'échelle d'observation, donc avec la taille du domaine d'étude choisi *a priori*.

3.5 Calcul des flux et de la perméabilité

Le calcul des flux dans le réseau ainsi établi et pour le gradient hydraulique (valeur absolue, direction et sens) choisi permet de définir les axes d'écoulement de l'eau souterraine et de déterminer la perméabilité du réseau de fractures du socle archéen de Touba, pour les hypothèses choisies et décrites ci-dessus. La recherche des flux en régime permanent dans l'amas infini est réalisée selon la loi de Darcy dans les conditions aux limites de type gradient avec une différence de charge hydraulique imposée de 1 bar. On fait l'hypothèse d'un écoulement idéal au niveau de chaque segment de fracture et le flux total Q est proportionnel au gradient de charge conformément à la loi de Darcy (Équation 5) :

$$Q = K L^2 \frac{h_1 - h_0}{L} = K L \Delta h \quad (5)$$

où L est la taille du domaine, h_1 et h_0 sont les charges hydrauliques locales, K est la perméabilité.

Le calcul de la perméabilité est réalisé sur une grille irrégulière dont les nœuds sont formés par l'intersection des fractures dans le réseau ou par l'intersection entre une fracture et les limites du système. La discrétisation conduit à un système d'équations de dimension égale au nombre de points du réseau dont la solution est la perméabilité du réseau de fractures. La méthode de résolution utilisée est la décomposition LU (DE DREUZY et ERHEL, 2003). La perméabilité est calculée sur le réseau complet où toutes les fractures de l'amas infini

participent à l'écoulement, ainsi que sur le réseau tronqué où les fractures inférieures à 900 m sont supprimées.

La modélisation des flux permet d'observer des écoulements concentrés dans les grandes fractures (Figure 6c). Selon DE DREUZY (2000), la distribution en loi puissance des longueurs de fractures induit des écoulements fortement chenalisés. Il apparaît une chenalisation du cheminement de l'eau et les axes préférentiels épousent une direction générale NE-SW. Sur la figure 6c, la teinte des chemins indique l'intensité du flux. Les axes de teinte plus foncée correspondent aux chemins où le flux est maximum. Les transferts s'effectuent selon l'axe de drainage N-S dans les secteurs nord et ouest de la zone étudiée. L'axe de drainage de direction E-W au sud de Touba connecte un nombre important d'accidents structuraux. Le coin sud-est n'est pas connecté à l'amas principal dans la fenêtre d'étude.

3.6 Comparaison de la carte des flux et des débits des forages

La carte des débits des forages est surimposée à celle des flux pour rechercher d'éventuelles concordances entre les axes de drainage calculés à partir du modèle hydrogéologique et les zones à bonne potentialité hydrogéologique (Figure 7). C'est une approche indirecte de validation des résultats théoriques produits par le modèle hydrogéologique. À cet effet, sont utilisés les débits en fin de foration qui caractérisent la transmissivité

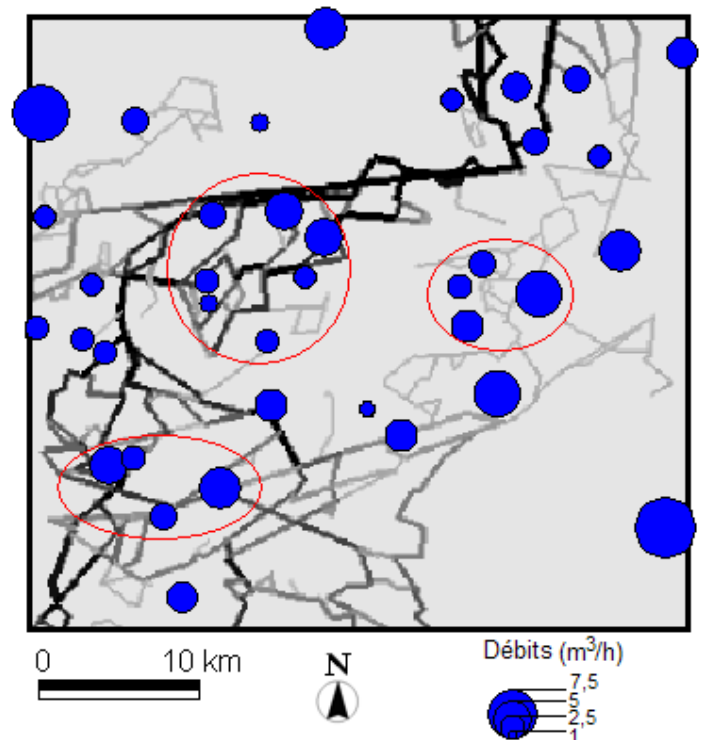


Figure 7. Relations entre les flux simulés dans le réseau de fractures et les débits des forages.
Relationship between simulated flow in the fracture network and well discharge.

locale des aquifères captés. Plus de la moitié des forages a été implantée sur la base de critères géomorphologiques (bas de versant, proximité d'un cours d'eau, alignements structuraux, etc.) ou sociologiques (proximité du logement des autorités coutumières, dans le village, à l'école, etc.), la photo aérienne et la géophysique n'intervenant que pour les cas d'échecs répétés (GÉOMINES, 1982). Les forages à débits moyens ($2,5$ à $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) et forts (5 à $7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) semblent se superposer aux flux simulés par le modèle hydrogéologique. Dans le centre et à l'ouest, les résultats sont satisfaisants. Les secteurs à débits forts ($> 7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) sont recherchés pour l'implantation de forages d'Hydraulique Villageoise Améliorée (HVA) destinés à l'approvisionnement en eau des grandes agglomérations comme Touba.

Dans les coins NW et SE, où les fractures ne sont pas connectées à l'amas percolant, des forages à débit élevé ($10,7$ et $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) sont néanmoins observés. Le calcul des flux étant effectué sur l'amas infini principal détecté, il n'y a pas de flux modélisé dans ces secteurs.

L'examen des coupes géologiques des deux forages à fort débit des secteurs NW ($10,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) et SE ($12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) montre respectivement cinq et quatre arrivées d'eau. Les observations de terrain montrent que ces forages sont situés dans des couloirs de cisaillements. De plus, les fractures horizontales et subhorizontales observées sur le terrain ne sont pas intégrées dans le modèle alors qu'elles induisent une connectivité horizontale améliorant la productivité des forages.

La concordance partielle entre les deux sources de données (modèle hydrogéologique, mesures de débits *in situ*) au niveau des zones à productivités moyenne et forte constitue un résultat intéressant dans la perspective de la recherche des sites d'implantation de forages à gros débits.

3.7 Caractéristiques hydrauliques dérivées du modèle géométrique du réseau

Les flux simulés à partir de l'amas principal infini ont été utilisés pour l'estimation de la perméabilité équivalente globale. On fait l'hypothèse que toutes les fractures ont la même ouverture et, par conséquent, la même perméabilité ($K_f = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Pour le réseau naturel complet, la perméabilité équivalente K_{Rn} est égale à $0,037 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, alors que pour le réseau tronqué, dans lequel les fractures de tailles inférieures à 900 m ont été filtrées, K_{Rt} est égale à $0,024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ce paramètre hydraulique est lié au modèle géométrique de réseau choisi. Or, le réseau de fractures se heurte au problème de sous-échantillonnage des fractures de petite taille ($< 900 \text{ m}$) et à la troncature des fractures dont la taille est plus grande que le domaine. Ces biais dans les données ont une incidence sur

les perméabilités calculées, comme l'expriment les résultats différents obtenus pour les réseaux naturel et tronqué.

Les valeurs de perméabilités équivalentes sont normalisées en prenant en compte les caractéristiques hydrauliques *in situ*, comme la conductivité hydraulique moyenne (K_{hm}) qui est considérée constante. MOURZENKO *et al.* (2004) ont montré que la perméabilité d'un réseau de fractures en loi puissance avec une conductivité uniforme est proportionnelle à la densité des surfaces des fractures. En utilisant la valeur de $K_{hm} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, déterminée par BIÉMI (1992) sur plus de quatre-vingt forages dans le bassin versant de la Marahoué, situé à l'est de la région de Touba, la perméabilité du réseau naturel complet K_{Rn} est égale à $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur est comparable et cohérente avec les valeurs de perméabilités induites par les fractures calculées par la méthode de FRANCIS (1970), obtenues dans le bassin de la Marahoué (BIÉMI, 1992), à Man-Danané (KOUAMÉ, 1999) et à Korhogo (JOURDA, 2005) qui oscillent entre 10^{-8} et $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans la région d'Odienné (bassin du Bani-Niger) et au Burkina Faso (bassin de la Sissili), SAVANÉ (1997) et SAVADOGO (1984) ont quant à eux obtenu des valeurs plus faibles et inférieures à $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Les estimations de la perméabilité équivalente à partir du modèle hydrogéologique testé sont cohérentes avec les mesures *in situ* réalisées dans le socle fracturé d'Afrique de l'Ouest. Ceci est une indication de la robustesse et de la performance de ce modèle à fractures discrètes, appliqué pour la première fois en Côte d'Ivoire.

4. DISCUSSION

Les caractéristiques géométriques (distribution des longueurs de fractures en loi puissance) et fractales (auto-similaire) montrent que le réseau de fractures de Touba peut être décrit par le modèle mathématique développé par DAVY *et al.* (1990). L'architecture du réseau de fractures est fortement tributaire du support de caractérisation de la fracturation ainsi que de l'expérience du photo-interprète. Les images satellitaires Landsat-TM, utilisées dans le cadre de cette étude, possèdent une limite de résolution spatiale qui est à la base du sous-échantillonnage des petites fractures et, par conséquent, engendre des biais dans la cartographie du réseau. Afin de réaliser une description plus fine du réseau de fractures et de prendre en compte différentes échelles spatiales de mesure, il serait souhaitable d'utiliser d'autres images de résolution spatiale plus fine telles que les images IKONOS, QUICKBIRD et SPOT-5 que l'on devra aussi coupler aux investigations de terrain pour une meilleure caractérisation des systèmes géométriques de Touba. Comme le suggère ODLING (1997), cela permettra de faire un échantillonnage à différentes échelles et de recalculer les

données pour que les lois d'échelles définies aboutissent à des distributions représentatives des caractéristiques géométriques du réseau étudié.

Dans le réseau de fractures de Touba, l'hétérogénéité de la distribution des flux est l'un des résultats les plus frappants. Elle se manifeste, pour les hypothèses théoriques d'écoulement choisies, par la chenalisation extrême du flux dans les grandes fractures. La modélisation hydrogéologique d'un tel réseau peut prendre en compte les grandes structures de façon déterministe et les fractures de petite taille de façon stochastique (LEE *et al.*, 2001). Le couplage de ces deux approches peut donner un modèle efficace. Toutefois, selon HSIEH (1998), la question fondamentale dans la modélisation n'est pas tant le choix entre une approche continue où discrète que dans la détermination du niveau d'hétérogénéité ou de détail à inclure dans le modèle. En effet, l'approche continue et l'approche discrète deviennent équivalentes si, pour l'approche continue, la maille élémentaire d'homogénéisation est inférieure ou de l'ordre de la taille des plus petites fractures du système.

L'un des défis, pour que les modèles mathématiques soient opérationnels et applicables, est la validation des résultats des simulations (HOFFMANN et SANDER, 2007). Les résultats issus du modèle présenté au sein de cet article sont théoriques et restent tributaires des hypothèses simplificatrices formulées (toutes les fractures sont perméables, les fractures ont la même ouverture, les fractures sont perméables sur toute leur étendue, le domaine d'étude a été choisi arbitrairement, il a une forme carrée, indépendante de la topographie, etc.). L'un des avantages de l'approche discrète réside dans l'utilisation des données à la fois géométriques et hydrauliques pour construire des modèles de propriétés hydrauliques simples et cohérents. Le modèle hydrogéologique utilisé dans cette étude a été validé par BOUR *et al.* (2002) dans le bassin de Hornelen en Norvège où le réseau de fractures a été cartographié à des échelles allant du mètre au kilomètre. L'originalité de cette approche réside dans l'exploitation des informations géométriques pour analyser les propriétés hydrauliques afin de définir les modèles d'écoulement typiques associés. Les études numériques menées avec ce modèle ont mis en évidence une forte influence des paramètres géométriques de distribution de longueur et d'ouverture sur les caractéristiques de l'écoulement (BOUR, 1997; DARCEL, 2002; DE DREUZY, 2000). Il convient alors de tester diverses autres hypothèses de distribution statistique et de corrélation entre les paramètres (recherche des modèles les plus pertinents), d'une part, et de confronter les propriétés hydrauliques globales obtenues par le modèle aux observations et mesures de terrain, d'autre part.

Le recours aux caractéristiques du système hydrogéologique naturel pour la calibration et la validation du modèle

géométrique ainsi que du modèle hydraulique qui en découle s'avère indispensable pour tester la performance du modèle. Ce test a été réalisé à l'aide des données de débits de forages. La concordance est partielle entre les zones d'écoulement du modèle et les forages à débits moyens et forts. Pour conforter la validité des flux simulés et évaluer les interrelations entre les écoulements et la ressource en eau, les débits d'étiages des cours d'eau pourraient aussi être analysés et être confrontés à un modèle qui prendrait en compte l'influence de la topographie sur les écoulements naturels. Dans ce contexte granito-gneissique, soumis à un climat tropical ($1\,200\text{--}1\,700\text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$), les débits d'étiages pourraient en effet traduire le drainage des aquifères, donc les propriétés de ces derniers, de manière plus intégrée que les données ponctuelles issues de forages.

Le choix d'étudier en priorité des modèles de réseaux 2D a été motivé, d'une part, par le manque de données tridimensionnelles complètes et, d'autre part, par les limites de capacité numérique. Il est à noter qu'un ensemble d'observations 2D ne conduit à des informations tridimensionnelles que si les plans d'observation sont corrélés, ce qui n'est pas le cas en général (DE DREUZY, 2000). L'extrapolation des données 2D et 3D nécessite l'utilisation d'une hypothèse sur la structure du réseau, une sorte d'hypothèse d'ergodicité qui permet de fixer les propriétés 3D du réseau grâce à des observations 2D.

5. CONCLUSION

La télédétection satellitaire est couplée aux travaux de géologie structurale pour la cartographie du réseau de fractures de la région de Touba. Les paramètres géométriques (lois d'échelles) indiquent que le réseau a atteint un stade de développement très avancé (distribution des longueurs de fractures en loi puissance) et est fractal (auto-similaire). Ces caractéristiques géométriques sont utilisées pour décrire le réseau. Elles permettent de définir le régime de connectivité qui conditionne les modalités de détermination de la perméabilité équivalente.

Les flux simulés dans le réseau montrent, pour les hypothèses théoriques retenues, une chenalisation qui épouse une direction générale NE-SW. Le transfert de flux s'effectue au droit des fractures de tailles régionales qui contrôlent la connectivité du réseau. La concordance partielle entre les axes souterrains définis par le modèle à fractures discrètes et les forages à débits moyens et forts constitue un résultat encourageant pour la prospection des eaux souterraines dans le socle fracturé de Touba.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements au ministère de l'Enseignement supérieur de la Côte d'Ivoire qui a accordé une bourse de stage à Ghislain AKAFFOU pour effectuer une partie de ses travaux de 3^e cycle dans l'équipe de Philippe DAVY au CAREN, Université de Rennes 1, France, et aux correcteurs anonymes dont les commentaires ont permis d'améliorer le manuscrit.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSSON J. et R. THUNVI (1986). Predicting mass transport in discrete fracture networks with the aid of geometrical field data. *Water Resour. Res.*, 22, 1941-1950.
- BALBERG I. (1984). Excluded volume and its relation to the onset of percolation. *Phys. Rev.*, 30, 3933-3943.
- BASSOLÉ A., J. BRUNNER et D. TUNSTALL (2001). *SIG et appui à la planification et à la gestion de l'environnement en Afrique de l'Ouest*. Rapport de synthèse, World Resources Institute, 48 p.
- BIÉMI J. (1992). *Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire)*. Thèse d'État, Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 480 p.
- BODIN J. et M. RAZACK (1999). L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures; propriétés géométriques et lois d'échelles. *Bull. Soc. Géol. France*, 170, 579-593.
- BONNET E., O. BOUR, N. ODLING, I. MAIN, B. BERKOWITZ, P. DAVY et P. COWIE (2001). Scaling of fracture systems in geological media. *Rev. Geophys.*, 39, 347-383.
- BOUKARI M. et R. GUIRAUD (1985). L'hydrogéologie de régions de socle de l'Afrique intertropicale : l'exemple de Dassa-Zoumè (Bénin méridional). *J. Afr. Earth Sci.*, 3, 491-503.
- BOUR O. (1997). *Transfert de fluide dans les milieux fracturés : effets d'échelle*. Thèse de Doctorat, Univ. Rennes 1, France, 200 p.
- BOUR O. et P. DAVY (1997). Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution. *Water Resour. Res.*, 33, 1567-1583.
- BOUR O., P. DAVY, C. DARCEL et N. ODLING (2002). A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multi-scale mapping of a joint network (Hornelen Basin Norway). *J. Geophys. Res.*, 107, 1001-1012.
- CACAS M.C., E. LEDOUX, G. DE MARSILY, B. TILLIE, A. BARBEAU, E. DURAND, B. FEUGA et P. PEAUDECERF (1990). Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation. 1- The flow model. *Water Resour. Res.*, 26, 479-489.
- CAMIL J. (1984). *Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain*. Thèse d'État, Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 306 p.
- DARCEL C. (2002). *Corrélation dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques*. Thèse de Doctorat, Univ. Rennes 1, France, 223 p.
- DAVY P., A. SORNETTE et D. SORNETTE (1990). Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting. *Nature*, 348, 56-58.
- DE DREUZY J-R. (2000). *Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures. Discussion des modèles d'écoulement compatibles avec les principales propriétés géométriques*. Thèse de Doctorat, Univ. Rennes 1, France, 217 p.
- DE DREUZY J-R. et J. ERHEL (2003). Efficient algorithms for the determination of the connected fracture network and the solution to the steady-state flow equation in fracture networks. *Comp. Geosci.*, 29, 107-111.
- DE DREUZY J-R., P. DAVY et O. BOUR (2001). Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 1-Effective connectivity. *Water Resour. Res.*, 37, 2065-2078.
- DE MARSILY G. (1985). Flow and transport in fractured rocks: connectivity and scale effect. Dans : *17th International Symposium in Hydrogeology of Rocks of Low Permeability*, 5-9 janvier, Tucson, Arizona, USA, pp. 267-278.
- DESHOWITZ W.S., P. WALLMANN, J.E. GEIER et G. LEE (1991). *Discrete fractured network modeling of tracer migration experiments at the SCV site*. Swedish Nuclear

- Power and Waste Management, Stockholm, Sweden, SKB Report, 91-23.
- DESJARDINS R., S. IRIS, D.W. ROY, G.H. LEMIEUX et T. TOUTIN (2000). Efficacité des données de RADARSAT-1 dans la reconnaissance des linéaments : un bilan. *J. Can. Télédétection*, 26, 537-548.
- DEWANDEL B., P. LACHASSAGNE, R. WYNS, J.C. MARÉCHAL et N.S. KRISHNAMURTHY (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *J. Hydrol.*, 330, 260-284.
- DIRECTION DE LA GÉOLOGIE (1996). *Carte géologique provisoire de Touba à 1/200 000*. Ministère des Mines et de l'Énergie. 1 carte.
- DJRO S. (1998). *Évolutions tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma-Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)*. Thèse d'État, Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 121 p.
- FRANCISS O.F. (1970). *Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. Géomorphologie et géologie du Brésil*. Thèse de Doctorat Ingénieur, Univ. Grenoble 1, France, 112 p.
- GÉOMINES (1982). *Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise*. Direction Centrale de l'Hydraulique. République de Côte d'Ivoire. Cahier de Touba, 14, 20 p.
- HENTSCHEL H.G.E. et I. PROCCACIA (1983). The infinite number of generalised dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D.*, 8, 435-444.
- HIMYARI M.S., C. HOEPFFNER, M. BENZAKOUR et D. EL HADANI (2002). Étude structurale du Haut-Atlas Oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de SPOT. *Télédétection*, 2, 243-253.
- HOBBS W.H. (1904). Lineaments of the Atlantic border region. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 15, 483-506.
- HOFFMANN J. et P. SANDER (2007). Remote sensing and GIS in hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, 15, 1-3.
- HSIEH P.A. (1998). Scale effects in fluid flow through fractured geologic media. Dans : *Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology*. SPOSITO G. (Éditeur), Cambridge University Press, pp. 335-353.
- HSIEH P.A., A.M. SHAPIRO, C.C. BARTON, F.P. HAENI, C.D. JOHNSON, C.W. MARTIN, F.L. PAILLET, T.C. WINTER et D.L. WRIGHT (1993). Methods of characterizing fluid movement and chemical transport in fractured rock. Dans : *Field Trip Guide Book for Northeastern United States*. CHANEY, J.T. et J.C. HEPBURN (Éditeurs), Geol. Soc. Am., 2, pp. 1-30.
- JOURDA J.P. (2005). *Méthodologies d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'informations géographiques à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale. Cas de la zone test de Korhogo (Côte d'Ivoire)*. Thèse d'État, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 402 p.
- KONÉ M., Y. VIALETTE, P. TEMPIER, S. LEMOINE et J. CAMIL (1996). Transpression post-archéenne dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (craton Ouest africain). *Africa Geosci. Rev.*, 3, 407-411.
- KOUAMÉ K.F. (1999). *Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.
- KOUAMÉ K.F., M.J. PENVEN, B.H. KOUADIO, M.B. SALEY et C.C. GRONAYES (2006). Contribution des images ASTER de Terra et d'un Modèle Numérique d'Altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 6, 103-121.
- KOUAMÉ K.F., P. GIOAN, J. BIÉMI et K. AFFIAN (1999). Méthode de cartographie des discontinuités images extraites d'images satellitaires (exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 1, 139-156.
- KOUAMÉLAN A.N. (1996). *Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque*. Thèse de Doctorat, Univ. Rennes 1, France, 277 p.
- LASM T. (2000). *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques, application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat, Univ. Poitiers, France, 274 p.
- LEE S.H., M.F. LOUGH et C.L. JENSEN (2001). Hierarchical modeling of flow in naturally fractured formations with multiple length scales. *Water Resour. Res.*, 37, 443-456.

- LONG J.C.S., J.S. REMER C.R. WILSON et P.A. WITHERSPOON (1982). Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.*, 18, 645-658.
- MAHMOUD A. (1996). Lineament as groundwater exploitation guides in hard-rock terranes of arid region. *Can. J. Rem. Sens.*, 22, 108-116.
- MARÉCHAL J.C., B. DEWANDEL et K. SUBRAHMANYAM (2004). Contribution of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fissured layer of a hard rock aquifers. *Water Resour. Res.*, 40, 1-17.
- MARÉCHAL J.C., B. DEWANDEL, S. AHMED, L. GALEAZZI et F.K. ZAIDI (2006). Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. *J. Hydrol.*, 329, 281-293.
- MOURZENKO V.V, J.-F. THOVERT et P.M. ADLER (2004). Macroscopic permeability of three-dimensional fracture networks with power-law size distribution. *Phys. Rev. E.*, 69, 1-13.
- NERETNIEKS I. (1993). Solute transport in fractured rock. Applications to radionuclide waste repositories. Dans : *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. BEAR J., C-F. TSANG et G. DE MARSILY (Éditeurs), pp. 39-127.
- O'LEARY D.W., J.D. FRIEDMAN et H.A. POHN (1976). Lineaments, linear, lineations: some standards for old terms. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, 1463-1469.
- ODLING N. (1997). Scaling and connectivity of joint system in sandstones from Western Norway. *J. Struct. Geol.*, 19, 1257-1271.
- ODLING N., P. GILLESPIE, B. BOURGINE, C. CASTAING J.-P. CHILÈS, N. CHRISTENSEN, E. FILLION, A. GENTER, C. OLSEN, L. THRANE, R. TRICE, E. AARSETH, J. WALSH et J. WATTERSON (1999). Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs. *Petrol. Geosci.*, 5, 373-384.
- OUILLOU G. et D. SORNETTE (1996). Unbiased multifractal analysis: application to fault patterns, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3409-3412.
- PONTLEVOY O., R. LEFEBVRE, R. THERRIEN, R. MARTEL, M. OUELLET et C. LAMONTAGNE (2004). Numerical modeling of groundwater flow and mass transport in interconnected granular and rock aquifers at the Ville Mercier DNAPL-contaminated site, Quebec, Canada. Dans : *57th Canadian Geotechnical Conference*, 24-27 octobre, Québec (Québec), Canada, pp. 20-27.
- REYNOLDS P.J., H.E. STANLEY et W. KLEIN (1980). Large-cell Monte Carlo renormalization group for percolation. *Phys. Rev. B.*, 21, 1223-1245.
- SALEY M.B. (2003). *Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale, Discontinuités pseudo images et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 211 p.
- SAVADOGO A.N. (1984). *Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute-Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili*. Thèse d'État, Univ. Grenoble 1, France, 350 p.
- SAVANÉ I. (1997). *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale*. Thèse d'État, Univ. Abidjan, Côte d'Ivoire, 386 p.
- SNOW D.T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resour. Res.*, 5, 1273-1289.
- VIGNES-ADLER M., A. LE PAGE et P. M. ADLER (1991). Fractal analysis of fracturing in two African regions from satellite imagery to ground scale. *Tectonophysics*, 196, 69-86.
- WALSH J.J. et J. WATTERSON (1993). Fractal analysis of fracture using the standard box counting technique: valid and invalid methodologies. *J. Struct. Geol.*, 15, 1509-1512.
- WITHERSPOON P.A. (2000). Investigations at Berkeley on fracture flow in rocks: from the parallel plate model to chaotic systems. Dans : *Dynamics of Fluids in Fractured Rocks*. FAYBISHENKO B., P.A. WITHERSPOON et S.M. BENSON (Éditeurs), pp. 1-58.